

УДК 622.691.24

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПОРОЖНИНИ НАСОСНО-КОМПРЕСОРНИХ ТРУБ

А.К.Клов, **Б.В.Демків**

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42123

e-mail: public@nunge.edu.ua

Разработана математическая модель движения очистного устройства в полости насосно-компрессорных труб, которое пропускается по насосно-компрессорным трубам с целью повышения их гидравлической эффективности.

The mathematical model of motion of cleansing device is developed in the cavity of pump-compressors pipes, which is skipped on pump-compressors pipes with the purpose of increase of their hydraulic efficiency.

У процесі експлуатації свердловин родовищ газу та свердловин підземних сховищ газу, під час відбору одночасно з газом виноситься рідина, що перебуває як у фонтанних трубах, так і в наземних трубопроводах. Причиною відкладання газових гідратів і конденсату на внутрішній поверхні труб є відмінність температури і тиску у свердловині від пластових. Наявність рідкої фази та відкладень збільшує гідравлічний опір системи трубопроводів відбору газу, внаслідок чого зменшується дебіт свердловини, тобто зменшується гідравлічна ефективність насосно-компресорних труб (НКТ) та шлейфів.

В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу розробляються методи підвищення гідравлічної ефективності насосно-компресорних труб на підземних сховищах газу та газових родовищах. З цією метою було розроблено та запатентовано очисний пристрій для очищення порожнини НКТ (рис. 1). Основними вимогами до пристрою було забезпечення простоти конструкції, компактності та маневровості під час переміщення вниз під дією власної ваги, а під час руху угору під дією енергії газу із свердловини.

Пристрій складається з корпусу, утвореного зовнішньою 1 та внутрішньою 2 втулками, встановленими коаксіально, з можливістю зустрічного руху на відстань, що регулюється обмежувачем руху 4, з метою суміщення отворів 6 та 7, виконаних у втулках, і сполучення їх із порожниною корпусу 8 та манжетами 3, які виконують у пристрої функцію очисних елементів. Порожнина корпусу заповнюється через штуцер 6 газом під тиском, що під час руху пристрою угору до гирла свердловини заповнює порожнину манжет, приводячи їх у робочий стан процесу очищення НКТ.

Зі зменшенням діаметра трубопроводу збільшується тиск на еластичну оболонку, який передається рідині, що заповнює цю оболонку. За рахунок різниці тисків нестискуваної рідини і пружного середовища, що перебуває в жорсткій оболонці, зворотний клапан двосторонньої дії відкривається і частина рідини з оболонки перетікає всередину жорсткої оболонки, стискаючи пружне середовище і створюючи умови для проходження пристроєм ділянки меншого діаметра. За подальшого збільшення діаметра трубопроводу тиск в зоні еластичної оболонки зменшується і рідина з порожнини жорсткої

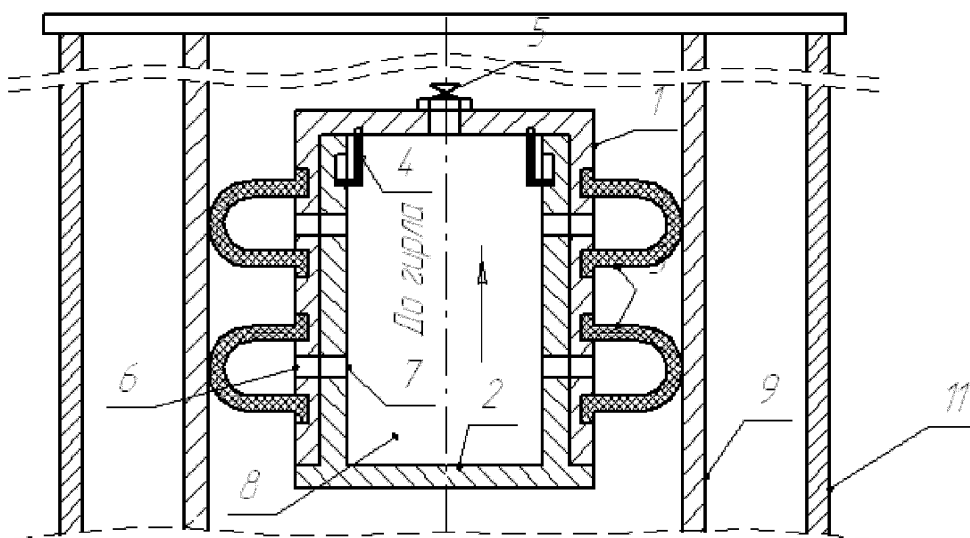
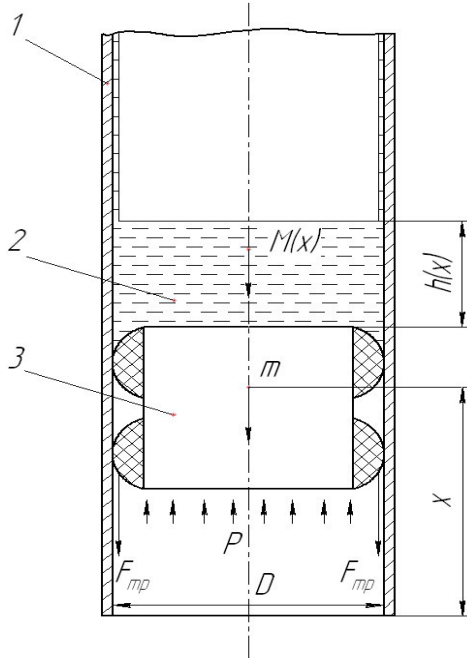


Рисунок 1 – Пристрій для очищення порожнини НКТ

оболонки виштовхується пружним середовищем крізь зворотний клапан двосторонньої дії, що сприяє вирівнюванню тисків.

Виникла необхідність у розробці математичної моделі руху очисного пристрою в насосно-компресорних трубах свердловини. Схема руху очисного пристрою насосно-компресорними трубами свердловини зображена на рисунку 2.



1 – насосно-компресорні труби; 2 – рідина;
3 – очисний пристрій

Рисунок 2 – Розрахункова схема руху очисного пристрою в порожнині НКТ

Рух очисного пристрою в порожнині НКТ описується рівнянням

$$(M(x) + m) \frac{d^2 x}{dt^2} = P \cdot f - F_{\text{тр}} - \frac{\lambda \cdot \rho \cdot h(x)}{2 \cdot D} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - (M(x) + m) \cdot g, \quad (1)$$

де: $M(x)$ – маса рідинної пробки, що змінюється з висотою підняття очисного пристрою;
 x – змінна координата руху очисного пристрою;

$\frac{d^2 x}{dt^2}$ – прискорення очисного пристрою;
 m – маса очисного пристрою;
 P – тиск газу на очисний пристрій;
 f – площа порожнини НКТ;
 $F_{\text{тр}}$ – сила тертя манжет очисного пристрою зі стінкою НКТ;
 λ – коефіцієнт гідравлічного тертя рідинної пробки;
 ρ – густина рідинної пробки;
 $h(x)$ – висота стовпа рідини над очисним поршнем;
 D – внутрішній діаметр НКТ;
 $\frac{dx}{dt}$ – швидкість руху очисного пристрою;

g – прискорення вільного падіння.

$$M(x) = \alpha \cdot x, \quad (2)$$

де α – кількість рідини в газовому просторі на одиницю довжини НКТ.

$$h(x) = \frac{4 \cdot \alpha \cdot x}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho}. \quad (3)$$

Враховуючи формули (2) та (3), формула (1) набуде вигляду

$$(\alpha \cdot x + m) \frac{d^2 x}{dt^2} = P \cdot f - F_{\text{тр}} - \frac{2 \cdot \lambda \cdot \alpha \cdot x}{\pi \cdot D^3} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - (\alpha \cdot x + m) \cdot g. \quad (4)$$

Враховуючи, що $\frac{dx}{dt} = y(x)$,

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dt} y(x) = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = y \frac{dy}{dx}, \quad \text{формула (4) матиме вигляд}$$

$$(\alpha \cdot x + m) y \frac{dy}{dx} = P \cdot f - F_{\text{тр}} - \frac{2 \cdot \lambda \cdot \alpha \cdot x}{\pi \cdot D^3} y^2 - (\alpha \cdot x + m) \cdot g. \quad (5)$$

Проведемо заміну $z = m + \alpha \cdot x$, тоді $dz = \alpha \cdot dx$.

Враховуючи те, що $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dx} = \alpha \cdot \frac{dy}{dz}$, формула (5) набуде вигляду

$$\alpha \cdot z \cdot y \frac{dy}{dz} = P \cdot f - F_{\text{тр}} - \frac{2 \cdot \lambda \cdot (z - m)}{\pi \cdot D^3} y^2 - z \cdot g. \quad (6)$$

Запишемо, що $P \cdot f - F_{\text{тр}} + \frac{2 \cdot \lambda \cdot m}{\pi \cdot D^3} = \Delta$,

$\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D^3} = k$, з врахуванням цього рівняння (6) набуде вигляду

$$\alpha \cdot z \cdot y \frac{dy}{dz} = \Delta - k \cdot z \cdot y^2 - z \cdot g. \quad (7)$$

Провівши відповідні перетворення отримаємо таке рівняння:

$$\frac{dy^2}{dz} = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha \cdot z} - \frac{2 \cdot k}{\alpha} \cdot y^2 - \frac{2 \cdot g}{\alpha}. \quad (8)$$

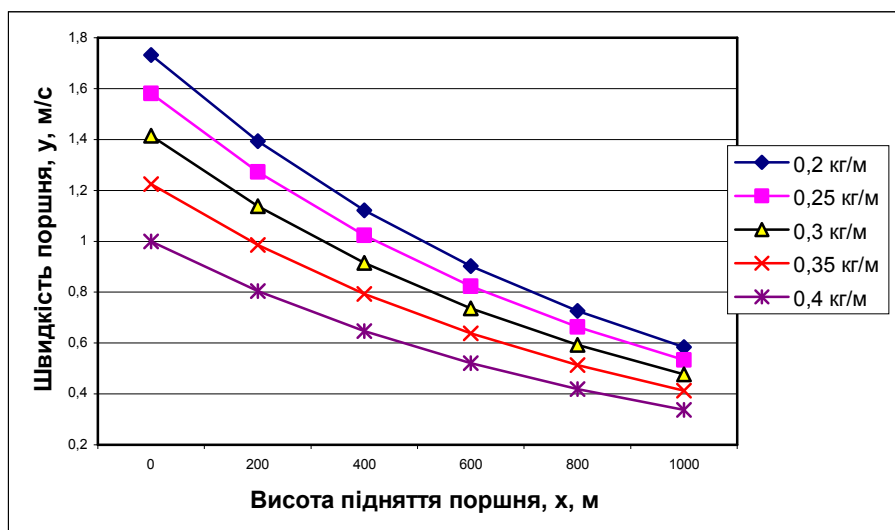
Приведемо рівняння (8) до вигляду:

$$\frac{dy^2}{dz} + \frac{2 \cdot k}{\alpha} \cdot y^2 = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha \cdot z} - \frac{2 \cdot g}{\alpha}. \quad (9)$$

Провівши заміну $y^2 = \varphi$, одержимо:

$$\frac{d\varphi}{dz} + \frac{2 \cdot k}{\alpha} \cdot \varphi = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha \cdot z} - \frac{2 \cdot g}{\alpha}. \quad (10)$$

Розв'язок диференційного рівняння (10) має вигляд:

Рисунок 3 – Залежність швидкості руху поршня від висоти його підняття для різних значень α

$$\varphi(z) = \exp\left(-\frac{2 \cdot k \cdot z}{\alpha}\right) \cdot \left(\int \frac{2 \cdot \Delta \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot k \cdot z}{\alpha}\right)}{\alpha \cdot z} dz - \int \frac{2 \cdot g}{\alpha} \exp\left(\frac{2 \cdot k \cdot z}{\alpha}\right) dz + C \right), \quad (11)$$

де C – стала інтегрування.

Після проведення перетворень і враховуючи, що $\varphi(z) = y^2$, отримаємо:

$$y^2 = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha} \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} (m + \alpha \cdot x)\right) \times \left(Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} (m + \alpha \cdot x)\right) - \frac{g}{k} + C \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} (m + \alpha \cdot x)\right) \right), \quad (12)$$

де $Ei(z)$ – інтегральна показникова функція,

$$Ei(z) = \int_{-\infty}^z \frac{\exp(z)}{z} dz.$$

За початкових умов $t = 0$,

$x = 0, y = \frac{dx}{dt} = 0$ формула 12 набуде вигляду:

$$0 = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha} \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right) \cdot Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right) - \frac{g}{k} + C \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right). \quad (13)$$

З рівняння (13) визначаємо сталу інтегрування:

$$C = \frac{g}{k} \exp\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right) - \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha} \cdot Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right). \quad (14)$$

В кінцевому результаті отримаємо формулу

$$y^2 = \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha} \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} z\right) \cdot \left[Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} z\right) - Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right) \right] - \frac{g}{k} (1 - \exp(-2 \cdot k \cdot x)). \quad (15)$$

Тоді швидкість руху очисного пристрою буде дорівнювати:

$$y(x) = \frac{dx}{dt} = \left\{ \frac{2 \cdot \Delta}{\alpha} \exp\left(-\frac{2 \cdot k}{\alpha} z\right) \cdot \left[Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} z\right) - Ei\left(\frac{2 \cdot k}{\alpha} m\right) \right] - \frac{g}{k} (1 - \exp(-2 \cdot k \cdot x)) \right\}^{1/2}. \quad (16)$$

Наприклад, за формулою 16 розрахуємо швидкість руху очисного пристрою для різних значень кількості рідини у газовому просторі α (0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4 кг/м) за таких вихідних даних: $m = 20$ кг; $P = 0,47$ МПа; $F_{mp} = 2500$ Н; $\lambda = 0,025$; $\rho = 1000$ кг/м³; $D = 0,1$ м. За результатами розрахунків побудовано графічні залежності швидкості руху очисного поршня в НКТ від висоти підняття поршня x для різних значень α (рис. 3).

Розроблена математична модель руху пристрою для очищення порожнини насосно-компресорних труб дозволяє оцінити залежність швидкості руху очисного поршня від висоти його підняття для різних значень кількості рідини в газовому просторі на одиницю довжини НКТ, що в свою чергу свідчить про ефективність очистки порожнини насосно-компресорних труб свердловини.

Література

1 Пат. 83492 Україна. МПК ⁷ Е 21 В 37/02, В 08 В 9/04, В 08 В 9/055. Пристрій для очищення порожнини насосно-компресорних труб у свердловині / Грудз В.Я., Клов А.К., Костів В.В., Демків Б.В.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № а2006 00216. заявка 10.01.2006; опубл 25.07.2008, Бюл №14.